

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Hrvoje Štrbac

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Hrvoje Juretić, dipl. ing.

Student:

Hrvoje Štrbac

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Hrvoju Juretiću na stručnoj i nesebičnoj pomoći u ovome radu.

Hrvoje Štrbac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Hrvoje Štrbac**

Mat. br.: 0035188933

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt postrojenja za pripremu kotlovske napojne vode**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of boiler feed water treatment plant**

Opis zadatka:

Potrebno je proračunati, konstruirati i izraditi crteže postrojenja za pripremu napojne vode u industrijskoj energiji, pri čemu treba uzeti u obzir odsoljavanje kotla.

Zadano:

- Parni kotao radnog tlaka 2,0 MPa, učina 25 t/h s povratom kondenzata od 10 do 15 m³/h
- Sastav sirove vode

Izgled	potpuno bistra
pH-vrijednost	7,15
Ukupna tvrdoća (mval/L)	6,9
m-alkalitet (mval/L)	6,0
Kalcijeva tvrdoća (mval/L)	4,7
Kloridi kao Cl ⁻ (mg/L)	32,5
Sulfati kao SO ₄ ²⁻ (mg/L)	45,5
Sadržaj SiO ₂ (mg/L)	8,9

Završni rad treba sadržavati:

1. izbor optimalnog tehnološkog postupka pripreme vode,
2. osnovni proračun svih posuda, ionskih masa i utrošak kemikalija,
3. tehnološku shemu postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad,
4. radioničke crteže dijelova postrojenja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

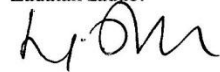
Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

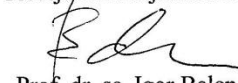
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:


doc. dr. sc. Hrvoje Juretić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Fizikalna i kemijska svojstva vode	1
1.2. Prirodne vode	2
1.3. Tvrdća vode.....	3
1.4. Utjecaj CO ₂ u vodi	4
2. IZBOR TEHNOLOŠKOG POSTUPKA.....	6
3. OPIS TEHNOLOŠKOG POSTUPKA	11
4. PRORAČUN POSTROJENJA.....	14
4.1. Dvoslojni ionski filter	14
4.1.1. Volumen mase slabo kiselog izmjenjivača	14
4.1.2. Volumen mase jako kiselog izmjenjivača.....	15
4.1.3. Dimenzije dvoslojnog ionskog filtra.....	17
4.1.4. Debljina stijenke plašta	18
4.1.5. Broj sapnica za filtraciju	19
4.2. Regeneracija slabo kisele ionske mase	19
4.2.1. Potrebna količina HCl.....	19
4.2.2. Odmjerna posuda za HCl (30%)	20
4.3. Regeneracija jako kisele ionske mase	21

4.3.1. Potrebna količina NaCl	21
4.3.2. Odmjerna posuda za NaCl (20%)	22
4.4. Otplinjivač CO ₂	23
4.5. Korekcija pH vrijednosti umekšane vode	24
4.6. Termički otplinjivač.....	26
4.7. Spremnik napojne vode.....	27
4.8. Uređaj za odsoljavanje	28
4.8.1. Skica termičkog otplinjivača i uređaja za odsoljavanje	28
4.8.2. Ekspanzijska posuda	29
4.8.3. Izmjenjivač topline.....	30
4.9. Kondicioniranje napojne vode	31
4.9.1. Količina NaOH za kondicioniranje.....	31
4.9.2. Količina natrijevog trifosfata	32
4.9.3. Količina hidrazina	32
4.9.4. Uređaj za doziranje kemikalija	33
4.10. Otpadne vode	34
4.10.1. Otpadne vode prilikom regeneracije ionskih filtara.....	34
4.10.2. Kapacitet bazena i turbopuhala	35
4.10.3. Neutralizacija otpadnih voda	35
4.11. Rekapitulacija potrošnje kemikalija.....	37
4.11.1. Potrošnja HCl (30%).....	37
4.11.2. Potrošnja NaCl (20%)	37
4.11.3. Potrošnja NaOH (40%)	37
4.11.4. Potrošnja Na ₃ PO ₄ (100%)	37
4.11.5. Potrošnja Lewoksina 15	37
5. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Proračun parametara ekspanzijske posude	30
----------------------------------------------------------	----

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz termičkog otplinjivača i uređaja za odsoljavanje	28
----------------------------------------------------------------------------------	----

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

000-000-000	Postrojenje za pripremu kotlovske napojne vode (tehnološka shema)
000-001-000	Postrojenje za pripremu kotlovske napojne vode (dispozicija opreme)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
A	Površina	m ²
AB	Alkalni broj	mg NaOH/kg
BV	Volumen ionske mase smještene u kolonu (filter) (engl. <i>bed volume</i>)	m ³
c	Brzina strujanja kroz otplinjivač	m/s
D	Promjer	mm, m
d	Unutarnji promjer	mm
E _t	Ekvivalentna težina	mg/mval
F	Površina poprečnog presjeka	m ²
G	Količina proizvedene pare	t/s
G _{ods}	Količina odsoljene vode	kg/h
G _{ov}	Količina kondenzata nastalog u eksp. posudi	kg/h
G _{uk}	Učin parnog kotla	kg/h
G ₀	Količina napojne vode	kg/h
G ₁	Količina dodatne napojne vode	kg/h
G ₂	Količina povratnog kondenzata	kg/h
G ₃	Količina odsoljene vode	kg/h
G ₄	Količina pare nastale u eksp. posudi	kg/h
ΔG	Ušteda na dodatnoj napojnoj vodi	kg/h
H	Visina	mm
h _{ods}	Entalpija odsoljene vode	kJ/kg
h _{ov1}	Entalpija kondenzata iz eksp. posude na ulazu u izmjenjivač topline	kJ/kg
h _{ov2}	Entalpija kondenzata iz eksp. posude na izlazu iz izmjenjivač topline	kJ/kg
h ₄	Entalpija vodene pare kod 105 °C	kJ/kg
KT	Karbonatna tvrdoća	mval/L, g CaO/L
K _d	Max. tvrdoća vode nakon dekarbonizacije	mval/L, g CaO/L
K _k	Korisni kapacitet mase	g CaO/L

k	Postotak povratnog kondenzata	
L	Duljina	m
M	molarna masa tvari	g/mol
N_{\min}	Minimalni broj sapnia	
Odp	Postotak odsoljavanja u odnosu na količinu proizvedene pare	%
Q	Volumenski protok	m ³ /h
p	tlak	bar
r	koeficijent valjanosti zavarenog spoja	
S	Koeficijent sigurnosti	
s	debljina stijenke plašta	mm
S_p	Specifično opterećenje filtra	m ³ /(hm ³)
t	Temperatura	°C
τ	Radni period između dvije regeneracije	h
τ_r	Vrijeme retencije otplinjivača	h
UT	Ukupna tvrdoća vode	mval/L, g CaO/L
u	Uparenje	
V	Volumen spremnika	m ³ /L
V_b	Volumen bazena	m ³
V_{m1}	Volumen slabo kisele mase	m ³
V_{m2}	Volumen jako kisele mase	m ³
V_o	Volumen termičkog otplinjivača	m ³
V_p	Volumen posude	L
V_z	Kapacitet turbopuhala	m ³ /h
ΔV_g	Ušteda na gorivu	m ³ /h
v	Specifični volumen pare	m ³ /kg
w	Brzina strujanja	m/s, m/h
z	Broj pogonskih sati	h/g
Z	oksidacijski broj iona	
η	Stupanj iskorištenja	
ρ	gustoća	kg/m ³
Φ	promjer	mm

SAŽETAK

U radu je proračunato i konstruirano postrojenje za pripremu napojne vode za parni kotao, radnog tlaka 2.0 MPa i učina 25 t/h sa povratom kondenzata od 10 do 15 m³/h, pri čemu je uzeto u obzir odsoljavanje kotla.

Tehnološki postupak kojim se osigurava propisana kvaliteta napojne vode za zadani parni kotao u industrijskoj energiji izabran je na temelju zahtjeva za kvalitetom vode, postotka odsoljavanja te ekonomske prihvatljivosti, a sastoji se od obrade vode primjenom ionskih izmjenjivača, otplinjavanja CO₂, te termičkog otplinjavanja.

U radu je prikazan proračun pojedinih dijelova postrojenja, koji uključuje:

- proračun volumena svih potrebnih posuda;
- proračun količina ionskih masa;
- proračun potrošnje kemikalija.

U prilogu su dani sljedeći crteži:

- shema postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad;
- tlocrt postrojenja (dispozicija opreme).

SUMMARY

The aim of this final thesis was to design a feedwater treatment plant for a boiler operating at 2.0 MPa, with a capacity of 25 t/h and a condensate return of 40–60% (10–15 m³/h), while taking into account the boiler blowdown.

The technological process that ensures the required boiler feedwater quality for the steam boiler in an industrial power plant was selected based on requirements for the water quality, the percentage of blowdown and economic acceptability, and consists of water treatment using ion exchangers, reduction of dissolved carbon dioxide level using a forced draft degasifier and thermal degassing.

The boiler feedwater treatment plant design calculations include:

- The sizing of all vessels required;
- The calculation of resin volumes required for ion exchange units;
- The calculation of the consumption of chemicals.

The following drawings are enclosed:

- Piping and instrumentation diagram;
- Disposition of equipment (positioning inside building, access for operation, maintenance and cleaning).

1. UVOD

1.1. Fizikalna i kemijska svojstva vode

Iz literature [1]

Voda je treća najjednostavnija molekula uopće, poslije H_2 i CO_2 , najrasprostranjenija tvar na zemlji.

Voda je jedini kemijski spoj koji se nalazi u 3 agregatna stanja – čvrsto, kapljevito i plinovito. Molekula vode se sastoji od dva lagana vodikova atoma i približno 16 puta težeg kisikovog atoma.

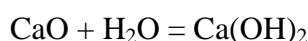
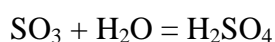
Gustoća vode ovisi o temperaturi. Najveća gustoća vode je kod $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, a povećanje ili smanjenje temperature ima za posljedicu promjenu volumena vode.

Toplinski kapacitet vode iznosi $c_p = 4,184\text{ kJ/kgK}$.

Voda također ima visoku entalpiju pa se ponaša kao veliki spremnik topline.

Značaj ove karakteristike je iznimno važan za klimatske uvjete na zemlji.

Voda je vrlo dobro otapalo za mnoge krute tvari, plinove, kiseline i lužine. S kiselim oksidima (oksidi nemetala) daje kiseline, a s bazičnim oksidima (oksidi metala) daje lužine, npr.



Kemijska reakcija vode može biti neutralna, kisela i lužnata. To ovisi o njenoj temperaturi, te vrsti i količini otopljenih soli, kiselina, lužina i plinova.

Soren Sorensen je uveo pojam pH vrijednosti:

$$pH = -\log[H^+]$$

Pri sobnoj temperaturi, za kemijski čistu vodu, pH vrijednost iznosi 7.

Što je neka otopina kiselija, pH vrijednost će biti manja, dok će lužnatija otopina imati veću pH vrijednost. S porastom temperature pH vrijednost kemijski čiste vode se smanjuje.

pH vrijednost direktno utječe na koroziju metala, što je česti problem u energetici.

1.2. Prirodne vode

Kemijski sastav prirodnih voda na Zemlji nije jedinstven i zavisi od podrijetla vode, zemljišta kroz koje voda teče ili s kojim je u dodiru, kao i od biljnih i životinjskih vrsta koje u njoj žive. Formiranje sastava prirodnih voda nastaje kao rezultat interakcije vode sa sredinom: mineralima, zemljištem i atmosferom.

Prirodne vode su uglavnom otopine soli i plinova. Kišnica sadrži otopljene plinove i nečistoće atmosfere: CO_2 , O_2 , N_2 , NH_4 , a u industrijskim mjestima i velikim gradovima apsorbira: SO_2 , H_2S , H_2SO_4 , HCl , čađu i prašinu.

Vode s područja vapnenca su tvrđe jer voda prolaskom kroz zemljine slojeve otapa vapnenac te pri tome pretvara netopivi CaCO_3 u topivi bikarbonat.

Voda slabije otapa vulkansko kamenje, pa su vode s tog područja vrlo mekane.

Prirodne su vode onečišćene raznim tvarima, koje možemo podijeliti u nekoliko osnovnih grupa:

1. Grube disperzije, čestice koje se mogu vidjeti običnim mikroskopom, ili čak prostim okom. Ova se gruba onečišćenja uklanjaju iz vode zadržavanjem na sitima, centrifugalnom separacijom i sedimentacijom
2. Koloidno dispergirane tvari čije su čestice veličine 10^{-4} do 10^{-7} cm. Koloidno dispergirane tvari mogu biti anorganske (glina) ili organske (ulja, masti, huminske tvari). Ova onečišćenja se otklanjaju koagulacijom, flokulacijom, membranskim postupcima, oksidacijskim postupcima i filtracijom.
3. Molekularne disperzije (otopine soli) čije su čestice veličine 10^{-6} do 10^{-7} cm. Otklanjaju se iz vode membranskim postupcima i primjenom ionskih izmjenjivača.
4. Plinovi kao npr. O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S , N_2 koji se otklanjaju raznim postupcima otplinjavanja.

1.3. Tvrdća vode

Iz literature [1]

Tvrdoća je svojstvo vode koje se odnosi na sadržaj minerala u vodi. Razlikuje se ukupna tvrdoća (UT), karbonatna (KT), ostatna (OT), kalcijeva (CaT) i magnezijeva (MgT) tvrdoća.

Ukupna tvrdoća se definira kao suma kalcijevih i magnezijevih soli, bez obzira o kojem se ravnotežnom anionu radi. Natrijeve soli su ovdje isključene.

Karbonatna tvrdoća je nastala otapanjem kalcijevih i magnezijevih karbonata posredstvom ugljične kiseline, pa se odnosi isključivo na kalcijeve i magnezijeve bikarbonate kao dio ukupne tvrdoće.

Važan parametar za određivanje karbonatne tvrdoće je alkalitet vode, odnosno sposobnost vode za neutralizacijom kiselina.

Ponekad je moguće koristiti i sljedeći izraz: $UT = KT + OT$, iz kojega se računa približni sadržaj ostatne tvrdoće.

Da bi se tvrdoća mogla brojčano izraziti i njezine vrijednosti međusobno uspoređivati uvedene su razne jedinice tvrdoće.

Najznačajnije su:

- 1 mval/L (milival po litri) koji odgovara sadržaju od 28 mg CaO/L
- 1 °nj (stupanj njemački) koji odgovara sadržaju od 10 mg CaO/L
- 1 °f (stupanj francuski) koji odgovara sadržaju od 10 mg CaCO₃/L
- 1 mmol/L (milimol po litri) koji odgovara sadržaju od 56 mg CaO/L

Ekvivalentna težina se definira kao:

$$E_t = \frac{M}{Z}$$

gdje je: E_t = ekvivalentna težina u g/val ili mg/mval;

M = molarna masa tvari u g/mol ili mg/mmol;

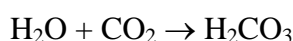
Z = oksidacijski broj iona tj. ionski naboj u val/mol ili mval/mmol.

1.4. Utjecaj CO₂ u vodi

Voda se obogaćuje ugljikovim dioksidom iz dva razloga:

- kontakt s atmosferom koja sadrži sve više ugljikovog dioksida
- prolaskom kroz humusno tlo bogato ugljikovim dioksidom koji je produkt mikrobiološke fermentacije organske tvari.

Otapanjem ugljikovog dioksida u vodi formira se ugljična kiselina:



Kada voda bogata ugljikovim dioksidom, dođe u dodir s karbonatnim stijanjem (vapnenac, krš) dolazi do njegovog otapanja.

Radi se uglavnom o kalcijevom i magnezijevom karbonatu (CaCO₃, MgCO₃) koji se pomoću ugljikovog dioksida otapaju konverzijom iz slabo topive karbonatne (CaCO₃) u vrlo topivu bikarbonatnu (Ca(HCO₃)₂) formu.

CO₂ može postojati u vodi kao slobodan i kao vezan. Vezani CO₂ se pretežno nalazi u bikarbonatima (HCO₃⁻), a manjim dijelom u karbonatima (CO₃²⁻). Slobodni CO₂ je sva preostala količina CO₂ otopljena u vodi. Dio slobodnog CO₂ koji održava karbonatne soli kalcija i magnezija u topivoj formi (kao bikarbonate) naziva se pripadajući CO₂, a preostali višak CO₂ ako ga u vodi ima naziva se agresivni CO₂.

Sadržaj pripadajućeg CO₂ ovisan je o karbonatnoj tvrdoći i to je veći što je karbonatna tvrdoća vode viša. Odstranimo li zagrijavanjem vode određeni dio pripadajućeg CO₂ doći će do sniženja karbonatne tvrdoće zbog raspada bikarbonata.

Jedan dio karbonata istaložiti će se kao mulj, a odgovarajući dio vezanog i slobodnog CO₂ otpliniti. U vodi će dalje ostati ravnoteža, tj. sadržaj pripadajućeg CO₂ odgovarat će novoj (nižoj) karbonatnoj tvrdoći.

Ako voda sadrži određenu količinu agresivnog CO₂, tada takva voda ima mogućnost daljnjeg otapanja karbonatnih soli. Time se sadržaj agresivnog CO₂ snizuje, a sadržaj pripadajućeg vezanog CO₂ povećava razmjerno s povišenjem karbonatne tvrdoće.

Ukupan sadržaj slobodnog CO₂ u vodi nije neograničen, već ovisi o visini karbonatne tvrdoće, temperaturi vode i dr. Zato u hladnoj vodi niske karbonatne tvrdoće može biti velika količina agresivnog CO₂, a u vodama visoke karbonatne tvrdoće vrlo mala ili pak agresivnog CO₂ uopće neće biti.

Korozivna sposobnost vode je u velikoj mjeri ovisna o sadržaju agresivnog CO₂. Voda koja ne sadrži agresivni CO₂, već samo pripadajući djeluje mnogo manje korozivno od one koja sadrži agresivni CO₂, uslijed koje korozija može biti veoma snažna.

2. IZBOR TEHNOLOŠKOG POSTUPKA

Zbog nepovoljnih efekata opisanih u uvodu, koje u kotlu izaziva kemijski i termički nedovoljno kvalitetna napojna voda i voda u optočnom sistemu parnog kotla, potrebno je istu na odgovarajući način pripremiti. Kvaliteta vode propisana je standardom

HRN EN 12953-10:2004, tj. hrvatski naslov je Dimnocijevni kotlovi – 10. Dio. [2]

Tako za parni kotao čiji radni tlak iznosi 20 bara, napojna voda mora imati sastav:

- izgled vode: potpuno bistra
- pH vode pri 25 °C: 9,2 do 9,5
- ukupna tvrdoća: < 0,01 mmol/L
- sadržaj željeza: < 0,3 mg/L
- sadržaj bakra: < 0,05 mg/L
- sadržaj ulja: < 1 mg/L
- sadržaj kisika: < 0,05 mg/L

Kotlovska voda mora imati sljedeći sastav:

- izgled vode: bistra, bez stabilne pjene
- p-alkalitet: < 12
- pH vode pri 25 °C: 10,5-12,0
- sadržaj SiO₂: < 120 mg/L
- alkalni broj: od 400 do 500 mg NaOH/kg

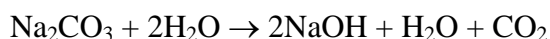
Voda zadanog sastava može se pripremiti pomoću sljedećih tehnoloških postupaka:

1. Umekšavanje sirove vode neutralnom kationskom izmjenom pomoću jako kiselih kationskih izmjenjivača u Na-formi.
2. Dekarbonizacija sirove vode pomoću slabo kiselih kationskih izmjenjivača te umekšavanje neutralnom kationskom izmjenom. Moguće su dvije varijante:
 - dva jednoslojna filtra (jedan za dekarbonizaciju, a drugi za umekšavanje);
 - izravna dekarbonizacija i umekšavanje sirove vode u dvoslojnom filtru.
3. Demineralizacija sirove vode pomoću kationskih i anionskih izmjenjivača.

Najkvalitetnija voda dobila bi se primjenom trećeg postupka tj. demineralizacijom. Taj postupak se uglavnom koristi za kotlove radnog tlaka većeg od 50 bara, koji prema standardu zahtijevaju visoku kvalitetu vode.

Standard za parne kotlove radnog tlaka 20 bara ne propisuje tako stroge uvjete na kvalitetu vode. Uz to, postrojenje za demineralizaciju zahtijeva velika investicijska ulaganja koja u ovom slučaju ne bi bila opravdana.

Ako se priprema vode vrši primjenom prvog postupka, umekšana voda sadrži određenu količinu natrijevih soli (Na_2SO_4 , NaCl) te natrijevog bikarbonata (NaHCO_3). Natrijev bikarbonat je nestabilna sol koja se kod više temperature raspada na natrijev karbonat tj. sodu (Na_2CO_3). Soda se u parnom kotlu raspada na natrijev hidroksid i ugljikov dioksid.



Natrijev hidroksid povišuje alkalitet vode, dok ugljikov dioksid snizuje pH vrijednost i na taj način uzrokuje koroziju kondeznoh trakta.

Zbog toga je prije umekšavanja potrebna dekarbonizacija sirove vode.

Zbog povećanja sadržaja soli u parnom kotlu potrebno je izvršiti njegovo odsoljavanje.

Pod pojmom odsoljavanja podrazumijeva se kontinuirano ili periodičko odvođenje određene količine vode iz kotla, čime se povećanje sadržaja soli održava unutar dozvoljenih vrijednosti. U slučaju primjene prvog tehnološkog postupka, postotak odsoljavanja računa se na slijedeći način:

- udio povratnog kondenzata:

$$k = \frac{G_2}{G_{uk}} \quad (1)$$

$$G_2 = 10\text{--}15 \text{ t/h}$$

$$G_{uk} = 25 \text{ t/h}$$

$$k_1 = \frac{10}{25} = 0,4$$

$$k_2 = \frac{15}{25} = 0,6$$

- alkalni broj (AB) napojne vode:

$$AB = KT [\text{mval/L}] \times E_t (\text{NaOH}) \times (1-k)$$

$$AB_1 = 6 \times 40 \times (1-0,4) = 144 \text{ mg NaOH/kg}$$

$$AB_2 = 6 \times 40 \times (1-0,6) = 96 \text{ mg NaOH/kg}$$

E_t – Ekvivalentna težina

- maksimalni dozvoljeni alkalni broj kotlovske vode:

$$AB_{\max} = 500 \text{ mg NaOH/kg}$$

- uparenje (u):

$$u = \frac{AB_{\max}}{AB}$$

$$u_1 = \frac{500}{144} = 3,47$$

$$u_2 = \frac{500}{96} = 5,21$$

- postotak odsoljavanja u odnosu na količinu proizvedene pare:

$$\text{Odp} = \frac{100}{u-1} \quad (2)$$

$$\text{Odp}_1 = \frac{100}{3,47-1} = 40,5\% \text{ od proizvedene pare}$$

$$\text{Odp}_2 = \frac{100}{5,21-1} = 23,8\% \text{ od proizvedene pare}$$

Zbog mogućnosti korozije kondezno trakt (nema dekarbonizacije sirove vode) i prilično velikog postotka odsoljavanja, ovaj postupak pripreme napojne vode bio bi ekonomski veoma nepovoljan. Veliki postotak odsoljavanja kotla uzrokovao bi njegovo napajanje većom količinom vode zbog koje bi nastao veći utrošak energije za transport vode, veće dimenzije ionskih izmjenjivača, veće količine sredstava za regeneraciju ionskih masa itd.

Sve dosad navedeno ukazuje na zaključak da je vodu zadanog sastava nužno pripremiti 2. tehnološkim postupkom. Tada je proračun odsoljavanja kako slijedi:

- alkalni broj napojne vode:

$$AB = KT [\text{mval/L}] \times E_t(\text{NaOH}) \times (1-k)$$

$$AB_1 = 0,357 \times 40 \times (1-0,4) = 8,57 \text{ mg NaOH/kg}$$

$$AB_2 = 0,357 \times 40 \times (1-0,6) = 5,71 \text{ mg NaOH/kg}$$

- uparenje:

$$u = \frac{AB_{\max}}{AB}$$

$$u_1 = \frac{500}{8,57} = 58,34$$

$$u_2 = \frac{500}{5,71} = 87,57$$

- postotak odsoljavanja u odnosu na količinu proizvedene pare:

$$\text{Odp} = \frac{100}{u-1}$$

$$\text{Odp}_1 = \frac{100}{58,34-1} = 1,74\% \text{ od proizvedene pare}$$

$$\text{Odp}_2 = \frac{100}{87,54-1} = 1,16\% \text{ od proizvedene pare}$$

Ako se računa postotak odsoljavanja prema sadržaju SiO_2 u sirovoj vodi tada slijedi:

- sadržaj SiO_2 u sirovoj vodi = 8,9 mg/L
- dozvoljeni sadržaj SiO_2 u kotlovskoj vodi = 120 mg/L

Postotak odsoljavanja u odnosu na količinu proizvedene pare:

$$\text{Odp} = (1-k) \times \frac{\text{SiO}_2}{(\text{SiO}_2)_{\max} - \text{SiO}_2} \times 100$$

$$\text{Odp}_1 = (1-0,4) \times \frac{8,9}{120-8,9} \times 100 = 4,8\% \text{ od proizvedene pare}$$

$$\text{Odp}_2 = (1-0,6) \times \frac{8,9}{120-8,9} \times 100 = 3,2\% \text{ od proizvedene pare}$$

Kako je postotak odsoljavanja računan prema sadržaju SiO_2 u sirovoj vodi veći, to se za daljnji proračun usvaja vrijednost postotka odsoljavanja dobivena na taj način.

Dvoslojni filter je skuplji od jednoslojnog, ali za cijelo postrojenje treba izraditi dva dvoslojna filtra, odnosno četiri jednoslojna, što odmah znači i više prostora za njihov smještaj.

Na temelju provedene analize odabran je tehnološki postupak za pripremu napojne vode koji se sastoji od dekarbonizacije sirove vode pomoću slabo kiselog kationskog izmjenjivača i umekšavanja neutralnom kationskom izmjenom u dvoslojnom ionskom filtru.

3. OPIS TEHNOLOŠKOG POSTUPKA

Postrojenje za pripremu vode ima neto kapacitet od 15 t/h vode.

Uzevši u obzir start postrojenja, količinu vode koja se koristi za razrjeđivanje kiseline i pripremu otopine NaCl, te za rahljenje i ispiranje, mora se predvidjeti nešto veći kapacitet.

Uzima se da je bruto kapacitet postrojenja 20 t/h vode.

Tehnološka shema postrojenja prikazana je na crtežu broj 1.

Postrojenje je predviđeno za kontinuirani pogon u trajanju od 16 sati, s regeneracijom svakih 16 sati.

Sastoji se od dvoslojnih ionskih filtara, otplinjivača CO₂, uređaja za termičku pripremu napojne vode, ekspanzijske posude, izmjenjivača topline te od pomoćnih posuda kao što su odmijerna posuda za HCl, rezervoar za HCl, odmijerna posuda za NaCl itd.

Dvoslojni ionski filtri ispunjeni su u gornjem sloju slabo kiselom kationskom masom, dok se u donjem sloju nalazi jako kiselu kationska masa u Na-formi.

Između masa nalazi se razdjelni križ sa sapnicama. Sirova voda uvodi se u filter sa gornje strane, tako da prvo prolazi kroz sloj slabo kisele kationske mase gdje se odvija izmjena kationa karbonatne tvrdoće. Daljnjim prolaskom kroz sloj jako kisele mase u Na-formi uklanjaju se soli ostatne tvrdoće, tj. ostvaruje se ionsko umekšavanje vode.

Regeneracija filtra izvodi se otopinom HCl (3%) s gornje strane i otopinom NaCl (8%) s donje strane, dok se otpadne kemikalije izvedu na sredini preko razdjelnog križa. On se sastoji od tri cijevi iz polipropilena u koje su uvrnute sapnice te od poprečnog nosača, također iz polipropilena koji je učvršćen na plaštu filtra.

Predviđena je primjena dvaju filtara, tako da je prilikom regeneracije jednog filtra drugi u pogonu.

Količina HCl (30%) potrebna za regeneraciju odmjeri se u odmijernoj posudi (5). Kako je to koncentrirana kiselina potrebno ju je razrijediti na koncentraciju 3%. To se postiže vodenim ejektorom kojim se istovremeno vrši transport kiseline iz te posude.

Rezerve koncentrirane klorovodične kiseline (HCl) drže se u posebnom spremniku (1), odakle se prirodnim putem transportiraju u odmjernu posudu. Posude su zatvorene zbog opasnosti od izlaženja para kiseline.

Svaka od posuda ima ugrađen apsorber za pare klorovodične kiseline koji je punjen aktivnim ugljenom. Prostor oko posuda je udubljen za 10 cm i spojen kanalima na neutralizacijski bazen (2), kako u slučaju izlijevanja kiseline ne bi došlo do oštećenja ostalih dijelova postrojenja ili do ljudskih stradanja.

Nakon dekarbonizacije i umekšavanja voda ima visok sadržaj CO_2 . Stoga je potrebno izvršiti otplinjavanje otopljenog ugljikovog dioksida u otplinjivaču CO_2 (6).

Iz otplinjivača voda slobodnim padom odlazi u spremnik umekšane vode (7), opremljen nivo-regulatorom. Iz spremnika se voda centrifugalnim pumpama tlači na termičku pripremu.

Prethodno voda prolazi kroz izmjenjivač topline (17), gdje se predgrijava topline od soljane vode od odsoljavanja parnog kotla. Voda od kontinuiranog odsoljavanja uvodi se u ekspanzijsku posudu (10), gdje ekspandira na tlak koji vlada u termičkom otplinjivaču.

Nastala para odlazi u termički otplinjivač (11). Količina vode koja ulazi u termički otplinjivač regulira se posebnim regulatorom sa plovkom koji osigurava konstantni nivo vode u napojnom spremniku.

Nakon dekarbonizacije i umekšavanja voda ima relativno nisku pH vrijednost. Radi povišenja pH vrijednosti potrebno je u cjevovod dozirati određenu količinu natrijeve lužine (NaOH) kako bi voda zadovoljila traženu kvalitetu.

Dodaje se 5%-tna otopina NaOH, a doziranje se vrši dozirnom pumpom (8).

Za regeneraciju jako kisele ionske mase koristi se 8%-tna otopina kuhinjske soli koja se dozira pomoću ejektora.

U posudi za sol (4) priprema se 20%-tna vodena otopina.

Posuda je opremljena miješalicom na električni pogon, a iznutra je potrebno ugraditi lim za razbijanje vrtloga.

Kondicioniranje napojne vode vrši se dodatkom natrijeve lužine, natrijevog trifosfata i Lewoksina (otopine hidrazina) uz pomoć dozirne pumpe (13).

Sve otpadne vode koje nastaju prilikom regeneracije, pranja, rahljenja i sl. prikupljaju se u neutralizacijskom bazenu (2), gdje se po potrebi obrađuju.

Otpadna voda smije se ispuštati samo ako joj se pH vrijednost kreće oko 7. To se kontrolira pomoću ugrađenog pH metra.

Budući da je otpadna voda kisela potrebno ju je neutralizirati pomoću natrijeve lužine i uz miješanje turbopuhalom (15). Za pražnjenje neutralizacijskog bazena koristi se centrifugalna pumpa. Da bi se osigurala rezerva ugrađuje se još jedna pumpa. Sve posude i armatura koja se koristi moraju biti gumirani iznutra.

4. PRORAČUN POSTROJENJA

4.1. Dvoslojni ionski filter

Neto kapacitet pojedinog filtra:

$$Q_{\text{neto}} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Bruto kapacitet pojedinog filtra:

$$Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

Radni period između dvije regeneracije:

$$\tau = 16 \text{ h}$$

4.1.1. Volumen mase slabo kiselog izmjenjivača

Za odabir ionskih masa koristi se literatura [6]

Odabrana je slabo kisela kationska masa Lewatit CNP 80, tvrtke Lanxess.

Korisni kapacitet mase:

$$K_k = 1645 \text{ mval/L}$$

Učinak filtra između dvije regeneracije

$$Q_u = Q \times \tau = 20 \times 16 = 320 \text{ m}^3/\text{reg}$$

$$\text{Učinak slabo kisele kationske mase} = Q_u [\text{m}^3/\text{reg}] \times K_T [\text{g CaO/m}^3]$$

$$\text{Učinak slabo kisele kationske mase} = 320 \times 6 \times 28 = 53760 \text{ g CaO/reg} = 1920 \text{ val/reg}$$

Volumen slabo kisele mase

$$V_{m1} = KT \text{ [mval/L]} \times Q \text{ [m}^3\text{/h]} \times \frac{\tau \text{ [h]}}{K_k \text{ [mval/L]}}$$

$$V_{m1} = 6 \times 20 \times \frac{16}{1645} = 1,167 \text{ m}^3$$

$$\text{Odabrano: } V_{m1} = 1,2 \text{ m}^3$$

Kontrola specifičnog opterećenja

$$S_p = \frac{Q \text{ [m}^3\text{/h]}}{V_{m1} \text{ [m}^3\text{]}} = \frac{20}{1,2} = 16,7 \text{ m}^3\text{/(hm}^3\text{)}$$

S_p se kreće u rasponu od 5 do 40 m³/(hm³)

4.1.2. Volumen mase jako kiselog izmjenjivača

Za umekšavanje odabrana je jako kisela kationska masa u Na-formi, Lewatit S 100 ST, tvrtke Lanxess.

Korisni kapacitet mase:

$$K_k = 1250 \text{ mval/L}$$

Ostatna tvrdoća sirove vode:

$$OT = UT - KT = 6,9 - 6 = 0,9 \text{ mval/L}$$

Maksimalna tvrdoća vode nakon dekarbonizacije:

$$K_d = 1^\circ \text{nj} = 0,357 \text{ mval/L}$$

Maksimalna ukupna tvrdoća sirove vode nakon slabo kisele izmjene u gornjem sloju ionskog filtra:

$$UT = OT + K_d = 0,9 + 0,357 = 1,257 \text{ mval/L}$$

$$\text{Učinak jako kisele kationske mase} = Q_u [\text{m}^3/\text{reg}] \times UT [\text{mval/L}]$$

$$\text{Učinak jako kisele kationske mase} = 320 \times 1257 = 402,24 \text{ val/reg} = 11262,7 \text{ g CaO/reg}$$

Potrebiti volumen jako kisele mase:

$$V_{m2} = \frac{UT [\text{mval/L}] \times \tau [\text{h}] \times Q [\text{m}^3/\text{h}]}{K_k [\text{mval/L}]} = \frac{1,257 \times 16 \times 20}{1250} = 0,322 \text{ m}^3$$

Kontrola specifičnog opterećenja:

$$S_p = \frac{Q [\text{m}^3/\text{h}]}{V_{m2} [\text{m}^3]} = \frac{20}{0,322} = 62,11 (\text{m}^3/\text{hm}^3)$$

Budući da je izračunano specifično opterećenje preveliko, uzima se veći volumen ionske mase.

$$\text{Odabrano: } V_{m2} = 0,73 \text{ m}^3$$

U tom slučaju specifično opterećenje iznosi:

$$S_p = 27,4 \text{ m}^3/\text{h m}^3$$

4.1.3. Dimenzije dvoslojnog ionskog filtra

Promjer dvoslojnog ionskog filtra:

$$d = 1500 \text{ mm}$$

Površina presjeka dvoslojnog ionskog filtra:

$$F = d^2 \times \frac{\pi}{4} = 1500^2 \times \frac{\pi}{4} = 1,767 \text{ m}^2$$

Visina sloja slabo kisele ionske mase:

$$H_1 = \frac{Vm1}{F} = \frac{1,2}{1,767} = 0,679 \text{ m}$$

Odabrano:

$$H_1 = 700 \text{ mm}$$

Visina sloja jako kisele ionske mase:

$$H_2 = \frac{Vm1}{F} = \frac{0,73}{1,767} = 0,413 \text{ m}$$

Odabrano:

$$H_2 = 500 \text{ mm}$$

Ukupna visina ionske mase:

$$H = H_1 + H_2 = 700 + 500 = 1200 \text{ mm}$$

Slobodni prostor:

$$H_3 = 1200 \text{ mm}$$

Ukupna visina ionskog filtra:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 = 700 + 500 + 1200 = 2400 \text{ mm}$$

Jako kisela ionska masa je smještena na ploči sa sapnicama koja se nalazi na visini od 100 mm, stoga ukupna visina plašta ionskog filtra iznosi.

$$H_{uk} = 2400 + 100 = 2500 \text{ mm}$$

4.1.4. Debljina stijenke plašta

Iz literature [7]

HRN M.E2.250

$p = 6 \text{ bar}$ - najveći dopušteni pogonski tlak

$D = 1500 \text{ mm}$ - promjer ionskog filtra

$D_v = 1510 \text{ mm}$ - pretpostavljeni vanjski promjer plašta

$K = 210 \text{ N/mm}^2$ - faktor čvrstoće materijala za S235JR

$S = 1,6$ - koeficijent sigurnosti

$r = 0,8$ - koeficijent valjanosti zavarenog spoja

HRN M.E2.253

Najmanja debljina stijenke plašta

$$s = \frac{D_v \times p}{20 \times \frac{K}{S} \times r + p}$$

$$s = \frac{1500 \times 6}{20 \times \frac{210}{1,6} \times 0,8 + 6} = 4,27 \text{ mm}$$

Odabire se debljina stijenke plašta:

$$s = 5 \text{ mm}$$

Kontrola vanjskog promjera:

$$D_v = D + 2 \times s = 1500 + 2 \times 5 = 1510 \text{ mm}$$

Dimenzije dvoslojnog ionskog filtra:

$$\Phi 1500 \times 2500 \times 5 \text{ mm}$$

4.1.5. Broj sapnica za filtraciju

Sapnice za filtraciju minimalne gustoće $80 / \text{m}^2$ se ugrađuju u nosivu ploču ionskog filtra.

Minimalni broj sapnica:

$$N_{\min} = F \times 80 = 1,767 \times 80 = 141,36$$

Broj sapnica za filtraciju je 142.

4.2. Regeneracija slabo kisele ionske mase

Regeneracija slabo kisele kationske mase provodi se svakih 16 h sa 3%-tnom otopinom HCl.

Potrebna količina HCl nalazi se u odmjernoj posudi, odakle se pomoću ejektora transportira u filter.

4.2.1. Potrebna količina HCl

Teoretski potrebna količina HCl:

$$\text{HCl (100\%)}_{\text{teor}} = E_t (\text{HCl}) \times \text{Učinak slabo kisele kationske mase [val/reg]} = 36,453 \times 1920$$

$$\text{HCl (100\%)}_{\text{teor}} = 69,888 \text{ kg/reg}$$

$E_t (\text{HCl})$ – ekvivalentna težina (HCl)

Praktički potrebna količina HCl:

$$\text{HCl (100\%)} = 1,05 \times \text{HCl (100\%)}_{\text{teor}} = 1,05 \times 69,888$$

$$\text{HCl (100\%)} = 73,382 \text{ kg/reg}$$

Potrebna količina HCl za regeneraciju:

$$\text{HCl (30\%)} = \text{HCl (100\%)} / 0,3 = 73,382 / 0,3$$

$$\text{HCl (30\%)} = 244,608 \text{ kg/reg}$$

$$\text{HCl (30\%)}_{\text{lit}} = \text{HCl (30\%)} / \rho(\text{HCl (30\%)}) = 244,608 / 1,15$$

$$\text{HCl (30\%)}_{\text{lit}} = 212,702 \text{ L/reg}$$

$$\rho(\text{HCl (30\%)}) - \text{gustoća HCl (30\%)} - \text{kg/m}^3$$

$$\text{Dnevna potrošnja HCl (30\%)} = 212,702 \text{ L}$$

Količina vode potrebna za razrjeđivanje kiseline sa 30%-tne na 3%-tnu:

$$Q_v = \frac{30-3}{3/1,15} \times \text{HCl (30\%)} = 10,35 \times 212,702$$

$$Q_v = 2201,46 \text{ L/reg}$$

U vremenu od 30 minuta u filter se uvodi:

$$Q_r = 2 \times (\text{HCl (30\%)} + Q_v) = 2 \times (212,702 + 2201,46)$$

$$Q_r = 4828,3 \text{ L/h} = 4,83 \text{ m}^3/\text{h}$$

Kontrola specifičnog opterećenja:

$$S_p = \frac{Q_r}{V_{m1}} = \frac{4,83}{1,2} = 4,03$$

4.2.2. Odmjerna posuda za HCl (30%)

Volumen posude:

$$V_p = 1,2 \times \text{HCl (30\%)}_{\text{lit}} = 1,2 \times 212,702$$

$$V_p = 255,24 \text{ L}$$

Uzima se posuda dimenzija:

$$\Phi 600 \times 1000 \text{ mm}$$

Stvarni volumen posude iznosi 283 litre.

Posuda sa gornje strane mora biti zatvorena, kako iz nje ne bi izlazile pare klorovodične kiseline, koje su jako štetne.

4.3. Regeneracija jako kisele ionske mase

Regeneracija jako kisele ionske mase izvodi se istovremeno kad i regeneracija slabo kisele mase i to sa 8%-tnom otopinom NaCl.

Kod protustrujne regeneracije računa se sa potroškom soli od 150 kg NaCl/m^3 mase.

4.3.1. Potrebna količina NaCl

Potrebna količina NaCl:

$$\text{NaCl (100\%)} = V_{m2} \times \text{NaCl [kg/m}^3] = 0,73 \times 150$$

$$\text{NaCl (100\%)} = 109,5 \text{ kg/reg}$$

Potrebna količina NaCl za regeneraciju:

$$\text{NaCl (20\%)} = \text{NaCl (100\%)} / 0,2 = 109,5 / 0,2$$

$$\text{NaCl (20\%)} = 547,5 \text{ kg/reg}$$

$$\text{NaCl (20\%)}_{\text{lit}} = \text{NaCl (20\%)} / \rho(\text{NaCl (20\%)}) = 547,5 / 1,148$$

$$\text{NaCl (20\%)}_{\text{lit}} = 476,92 \text{ L/reg}$$

$$\rho(\text{NaCl (20\%)}) - \text{gustoća NaCl (20\%) - kg/m}^3$$

Dnevna potrošnja NaCl (20%) = 476,92 L

Količina vode potrebna za razrjeđivanje 20%-tne otopine NaCl na 8%-tnu:

$$Q_v = \frac{20-8}{8/1,148} \times \text{NaCl (20\%)} = 1,722 \times 476,92$$

$$Q_v = 821,26 \text{ L/reg}$$

U vremenu od 30 min u filter se uvodi:

$$Q_r = 2 \times (\text{NaCl (20\%)} + Q_v) = 2 \times (476,92 + 821,26)$$

$$Q_r = 2596,35 \text{ L/h} = 2,596 \text{ m}^3/\text{h}$$

Kontrola specifičnog opterećenja:

$$S_p = \frac{Q_r}{V_{m2}} = \frac{2,596}{0,73} = 3,55$$

Zbog opasnosti od podizanja slabo kisele kationske mase potrebno je zadovoljiti uvjet:

$$\frac{c_{p1}}{c_{p2}} \geq 1$$

$$c_{p1} = 4,83 \text{ m}^3/\text{h} - \text{protok HCl (3\%)}$$

$$c_{p2} = 2,596 \text{ m}^3/\text{h} - \text{protok NaCl (8\%)}$$

$$\frac{c_{p1}}{c_{p2}} = \frac{4,83}{2,596} = 1,86$$

4.3.2. Odmjerna posuda za NaCl (20%)

Volumen posude:

$$V_p = 1,2 \times \text{NaCl (20\%)}_{\text{lit}} = 1,2 \times 476,92$$

$$V_p = 572,3 \text{ L}$$

Uzima se posuda dimenzija :

$$\Phi 800 \times 1200 \text{ mm}$$

Volumen posude iznosi cca 600 L.

Posuda sadrži usisni filter koji zadržava krute čestice NaCl.

4.4. Otplinjivač CO₂

Dekarbonizirana i umekšana voda ima visok sadržaj CO₂, te se takva ne može koristiti kao dodatna napojna voda.

Da bi se odstranio suvišni CO₂ koristi se otplinjivač. To je cilindrična posuda ispunjena Raschigovim prstenima, u koju se odozgo uvodi umekšana voda, a odozdo se pomoću ventilatora dovodi protustrujno zrak.

Tako, prema Daltonovom zakonu izdvaja iz vode ugljikov dioksid, dok otplinjena voda odlazi u spremnik umekšane vode.

Brzina strujanja vode kroz otplinjivač:

$$w = 25 \text{ m/h}$$

Površina presjeka otplinjivača:

$$F = \frac{Q}{w} = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ m}^2$$

Promjer otplinjivača:

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,8}{\pi}} = 1 \text{ m}$$

Visina nosivog sloja Raschigovih prstena dimenzija $\Phi 50 \times 50 \text{ mm}$:

$$H_1 = 200 \text{ mm}$$

Visina nosivog sloja Raschigovih prstenova dimenzija $\Phi 30 \times 30 \text{ mm}$:

$$H_2 = 1800 \text{ mm}$$

Slobodni prostor za dovod vode:

$$H_3 = 1000 \text{ mm}$$

Ukupna visina plašta otplinjivača CO₂:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 = 200 + 1800 + 1000$$

$$H = 3000 \text{ mm}$$

Dimenzije otplinjivača CO₂:

$$\Phi 1000 \times 3000 \text{ mm}$$

Potrebna količina zraka za otplinjavanje:

$$V_z = w_z \times Q$$

$$w_z = 50 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ vode}$$

$$V_z = 50 \times 20 = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.5. Korekcija pH vrijednosti umekšane vode

Nakon otplinjavanja voda ima prenisku pH vrijednost.

Zbog toga se mora provesti korekcija pH vrijednosti, na primjer dodavanjem natrijeve lužine NaOH.

Teoretski potrebna količina NaOH:

$$\text{NaOH (100\%)}_{\text{teor}} = E_t (\text{NaOH})/E_t (\text{CO}_2) \times \text{CO}_2 [\text{mg/L}] = \frac{40}{44} \times 10$$

$$\text{NaOH (100\%)}_{\text{teor}} = 9,09 \text{ mg/L} = 9,09 \text{ g/m}^3$$

Praktički potrebna količina NaOH:

$$\text{NaOH (100\%)} = \text{NaOH (100\%)}_{\text{teor}} \times Q = 9,09 \times 20$$

$$\text{NaOH (100\%)} = 181,8 \text{ g/h} = 0,182 \text{ kg/h}$$

Potrebna količina NaOH za korekciju pH vrijednosti:

$$\text{NaOH (40\%)} = \text{NaOH (100\%)} / 0,4 = 0,182 / 0,4$$

$$\text{NaOH (40\%)} = 0,455 \text{ kg/h}$$

$$\text{NaOH (40\%)}_{\text{lit}} = \text{NaOH (40\%)} / \rho(\text{NaOH (40\%)}) = 0,455 / 1,43$$

$$\text{NaOH (40\%)}_{\text{lit}} = 0,318 \text{ L/h}$$

$$\rho(\text{NaOH (40\%)}) - \text{gustoća NaOH (40\%)} - \text{kg/m}^3$$

$$\text{Dnevna potrošnja NaOH (40\%)} = 0,318 \times 16 = 5,088 \text{ L}$$

U cjevovod se dozira 5%-tna otopina NaOH:

$$\text{NaOH (5\%)} = \text{NaOH (100\%)} \times 20 = 0,182 \times 20$$

$$\text{NaOH (5\%)} = 3,64 \text{ kg/h}$$

$$\text{NaOH (5\%)}_{\text{lit}} = \text{NaOH (5\%)} / \rho(\text{NaOH (5\%)}) = 3,64 / 1,059$$

$$\text{NaOH (5\%)}_{\text{lit}} = 3,44 \text{ L/h}$$

$$\rho(\text{NaOH (5\%)}) - \text{gustoća NaOH (5\%)} - \text{kg/m}^3$$

$$\text{Dnevna potrošnja NaOH (5\%)} = 3,44 \times 16 = 55 \text{ L}$$

Otopina NaOH priprema se u plastičnoj posudi, odakle se dozirnom pompom dozira u cjevovod.

Za kontinuirani pogon od 6 dana potrebno je pripremiti 330 L 5%-tne otopine NaOH.

Uzima se plastična posuda volumena $V = 400 \text{ L}$.

4.6. Termički otplinjivač

Napojna voda za napajanje parnog kotla ne smije sadržavati kisik, jer u protivnom dolazi do intenzivne korozije termoenergetskog bloka.

U svrhu odstranjivanja kisika iz napojne vode služi termički otplinjivač. Termičku pripremu mora također proći i povratni kondenzat.

Otplinjivanje se vrši na temperaturi od 105 °C.

Da bi se voda zagrijala na tu temperaturu u otplinjivač se dovodi potrebna količina pare. Pri tome se u dovodni parovod ugrađuje regulacijski ventil koji održava konstantni tlak bez obzira na dovedenu količinu vode.

Ukupni kapacitet otplinjivača jednak je proizvodnji pare:

$$G = 25 \text{ t/h}$$

Potrebni volumen otplinjivača:

$$V_o = \tau_r \times G = 0,05 \times 25$$

$$V_o = 1,25 \text{ m}^3$$

Brzina strujanja kroz otplinjivač:

$$c = 50 \text{ m/h}$$

Površina otplinjivača:

$$F = \frac{G}{c} = \frac{25}{50}$$

$$F = 0,5 \text{ m}^2$$

Promjer plašta otplinjivača:

$$D_o = \sqrt{\frac{4 \times F_o}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,5}{\pi}}$$

$$D_o = 0,798 \text{ m}$$

Uzima se promjer plašta otplinjivača:

$$D_o = 800 \text{ mm}$$

Površina otplinjivača:

$$F_o = \frac{\pi \times D_o^2}{4} = \frac{\pi \times 0,8^2}{4} = 0,50265 \text{ m}^2$$

Potrebna visina plašta otplinjivača:

$$H_o = \frac{V_o}{F_o} = \frac{1,25}{0,50265}$$

$$H_o = 2,4868 \approx 2,5$$

Dimenzije termičkog otplinjivača:

$$\Phi 800 \times 2500 \text{ mm}$$

4.7. Spremnik napojne vode

Volumen spremnika se odabire prema zahtjevu za rezervu u trajanju od 15 do 30 minuta.

$$V = (0,25 - 0,5) \times G = 0,32 \times 25 = 8 \text{ m}^3$$

Dimenzije spremnika napojne vode:

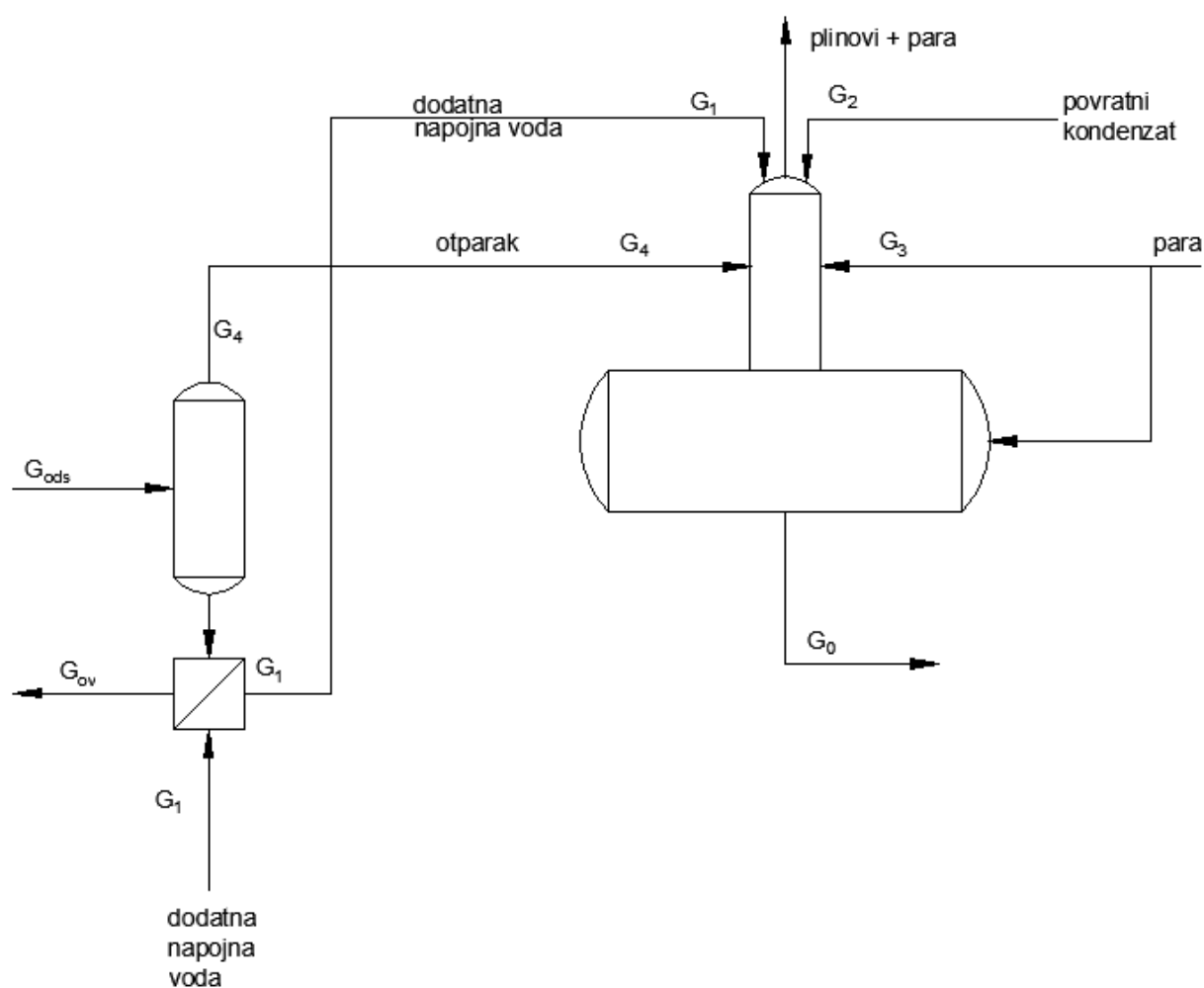
$$\Phi 1500 \times 4600 \text{ mm}$$

4.8. Uređaj za odsoljavanje

Uređaj za odsoljavanje se sastoji od ekspanzijske posude i izmjenjivača topline.

Ekspanzijska posuda služi za ekspanziju odsoljene kotlovske vode višeg tlaka, na tlak koji vlada termičkom otplinjivaču, a izmjenjivač topline služi za iskorištavanje topline kondenzata kojom se zagrijava dodatna napojna voda.

4.8.1. Skica termičkog otplinjivača i uređaja za odsoljavanje



Slika 1. Shematski prikaz termičkog otplinjivača i uređaja za odsoljavanje

4.8.2. Ekspanzijska posuda

Ekspanzijska posuda radi pod tlakom koji vlada u termičkom otplinjivaču, $p = 1,208$ bar.

Para nastala ekspanzijom odlazi u termički otplinjivač, a kondenzat u izmjenjivač topline. Posuda se odabire na osnovu brzine strujanja kroz ekspanzijsku posudu. koja ne smije biti veća od 10 m/s.

Odabire se posuda dimenzija:

$\Phi 400 \times 800$ mm

Potrebno je izvršiti kontrolu s obzirom na protočni volumen pare u ekspanzijskoj posudi.

Iz literature [5]

$h_{ods} = 908$ kJ/kg – entalpija odsoljene vode h' kod $p = 20$ bar

$h_{ov1} = 439,99$ kJ/kg – entalpija kondenzata nastalog u ekspanzijskoj posudi h' kod $t = 105$ °C

$h_{ov2} = 146,47$ kJ/kg – entalpija kondenzata na izlazu iz izmjenjivača topline h' kod $t = 35$ °C

$h_4 = 2682,6$ kJ/kg – entalpija vodene pare h'' kod $t = 105$ °C

$v = 1,419$ m³/kg – specifični volumen pare v'' kod $t = 105$ °C

Količina odsoljene vode:

$$G_{ods} [\text{kg/h}] = G_0 [\text{kg/h}] \times \text{Odp} (\%)/100 \quad (3)$$

Postotak pare nastale ekspanzijom:

$$p (\%) = [(h_{ods} - h_{ov1})/h_4] \times 100$$

$$p (\%) = [(908 - 439,99)/2682,1] \times 100 = 17,45\%$$

Količina pare nastale ekspanzijom:

$$G_4 [\text{kg/h}] = G_{ods} [\text{kg/h}] \times p (\%)/100 \quad (4)$$

Volumen pare:

$$V_p [\text{m}^3/\text{h}] = G_4 [\text{kg/h}] \times v [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (5)$$

Tablica 1. Proračun parametara ekspanzijske posude

G_2 [t/h]	10	11	12	13	14	15
k [/], iz (1)	0,4	0,44	0,48	0,52	0,56	0,6
Odp [%], iz (2)	4,8	4,48	4,16	3,84	3,52	3,2
G_{ods} [kg/h], iz (3)	1200	1120	1040	960	880	800
G_4 [kg/h], iz (4)	209,4	195,44	181,48	167,52	153,56	139,6
V_p [m ³ /h], iz (5)	297,1386	277,3294	257,5201	237,7109	217,9016	198,0924

Kontrola brzine kod strujanja $V_p = 297,14 \text{ m}^3/\text{h}$ (tablica 1):

$$w = \frac{V_p}{F} = \frac{\frac{297,14}{3600}}{\frac{0,4^2 \times \pi}{4}} = 0,66 \text{ m/s}$$

4.8.3. Izmjenjivač topline

U izmjenjivaču topline se zagrijava umekšana i dekarbonizirana dodatna napojna voda. Toplina za njeno zagrijavanje se uzima od zaostale koncentrirane vode iz parnog kotla. Koristi se kombinirani izmjenjivač topline kod kojeg toplija struja dva puta prolazi kroz izmjenjivač.

Kroz cijevni snop struji voda koja izlazi iz ekspanzijske posude, a dodatna napojna voda struji u prostoru oko cijevi.

4.9. Kondicioniranje napojne vode

Napojna kotlovska voda za parne kotlove, radnog tlaka $p = 2$ MPa treba imati pH vrijednost 10,5-12,0.

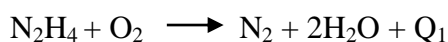
Korekcija, odnosno povišenje pH vrijednosti vrši se doziranjem 3%-tne otopine NaOH, u količini od cca 1 g/m^3 vode.

Da bi se spriječilo taloženje kamenca u cijevnim registrima parnog kotla u slučaju prodora soli u napojnu vodu, dozirat će se zajedno s lužinom 1-2%-tna otopina natrijevog trifosfata u količini od cca $0,5 \text{ g/m}^3$.

Otplinjena napojna voda imat će poslije termičkog otplinjivača cca 0,01-0,02 mg O_2/l . Kako kisik i ugljična kiselina uzrokuju koroziju u parnim postrojenjima potrebno ih je odstraniti iz napojne vode.

Najveći dio ugljične kiseline je otklonjen ionskom dekarbonizacijom, a otklanjanje zaostale količine kisika se postiže doziranjem otopine hidrazina, koncentracije 5-10% u količini cca 1 g/m^3 . U tom procesu hidrazina na sebe veže kisik i tako ga otklanja iz napojne vode.

Reakcija vezivanja kisika:



Svi preparati za kondicioniranje napojne vode mogu se dozirati zajedničkim uređajem koji je proračunat za kapacitet $G = 25 \text{ t/h}$.

4.9.1. Količina NaOH za kondicioniranje

$$\text{NaOH (100\%)} = 1 [\text{g/m}^3] \times G [\text{m}^3/\text{h}] = 25 \text{ g/h}$$

$$\text{NaOH (100\%)} = 0,025 \text{ kg/h}$$

$$\text{NaOH (40\%)} = \text{NaOH (100\%)} / 0,4 = 0,025 / 0,4$$

$$\text{NaOH (40\%)} = 0,0625 \text{ kg/h}$$

$$\text{NaOH (40\%)}_{\text{lit}} = \text{NaOH (40\%)} / \rho(\text{NaOH (40\%)}) = 0,0625 / 1,43 = 0,0437 \text{ L/h}$$

$$\rho(\text{NaOH (40\%)}) - \text{gustoća NaOH (40\%) - kg/m}^3$$

$$\text{Dnevna potrošnja NaOH (40\%)} = 0,0437 \times 16 = 0,7 \text{ L}$$

$$\text{NaOH (3\%)} = \text{NaOH (100\%)} / 0,03 = 0,025 / 0,03$$

$$\text{NaOH (3\%)} = 0,83 \text{ kg/h}$$

$$\text{NaOH (3\%)}_{\text{lit}} = \text{NaOH (3\%)} / \rho(\text{NaOH (3\%)}) = 0,83 / 1,035 = 0,805 \text{ L/h} = 12,88 \text{ L/dan}$$

$$\rho(\text{NaOH (3\%)}) - \text{gustoća NaOH (3\%) - kg/m}^3$$

4.9.2. Količina natrijevog trifosfata

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 (100\%) = 0,5 [\text{g/m}^3] \times G [\text{m}^3/\text{h}] = 12,5 \text{ g/h}$$

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 (100\%) = 0,0125 \text{ kg/h}$$

$$\text{Dnevna potrošnja Na}_3\text{PO}_4 (100\%) = 0,0125 \times 16 = 0,2 \text{ kg}$$

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 (1,5\%) = \text{Na}_3\text{PO}_4 (100\%) / 0,015 = 0,0125 / 0,015$$

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 (1,5\%) = 0,833 \text{ kg/h}$$

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 (1,5\%) = 0,833 \text{ L/h} = 13,33 \text{ L/dan}$$

4.9.3. Količina hidrazina

$$\text{N}_2\text{H}_4 (100\%) = 1 [\text{g/m}^3] \times G [\text{m}^3/\text{h}] = 25 \text{ g/h}$$

$$\text{N}_2\text{H}_4 (100\%) = 0,025 \text{ kg/h}$$

Hidrazin se dozira kao Lewoksin 15:

$$\text{N}_2\text{H}_4 (15\%) = \text{N}_2\text{H}_4 (100\%) / 0,15 = 0,025 / 0,15$$

$$\text{N}_2\text{H}_4 (15\%) = 0,166 \text{ kg/h}$$

$$\text{Dnevna potrošnja } \text{N}_2\text{H}_4 (15\%) = 0,166 \times 16 = 2,66 \text{ kg}$$

$$\text{Lewoksin } 15 (11\%) = \text{N}_2\text{H}_4 (15\%)/0,1\text{L} = 0,166/0,1 \text{ L}$$

$$\text{Lewoksin } 15 (11\%) = 1,51 \text{ kg/h}$$

$$\text{Lewoksin } 15 (11\%) = 1,51/1,008 = 1,5 \text{ L/h} = 24 \text{ L/dan}$$

4.9.4. Uređaj za doziranje kemikalija

Uređaj za doziranje se sastoji od posude za pripremu otopine i dozirne pumpe. Posuda mora imati volumen dovoljan za jednodnevni kontinuirani pogon, a kapacitet dozirne pumpe se može regulirati tako da odgovara ukupnoj satnoj potrošnji kemikalija za kondicioniranje.

Ukupna dnevna potrošnja otopine kemikalija:

$$V = \text{NaOH } (3\%) + \text{NaPO}_4 + \text{Lewoksin } 15 (11\%)$$

$$V = 12,88 + 13,33 + 24 = 50,21 \text{ L/dan}$$

Potrebni učinak dozirne pumpe:

$$Q_p [\text{l/h}] = V/\tau = 50,21/16$$

$$Q_p = 3,14 \text{ L/h}$$

Mogućnost variranja količine doziranja se postiže promjenom koncentracije pojedinih otopina i promjenom učina dozirne pumpe.

Radi toga dozirna pumpa treba imati sljedeće karakteristike:

$$Q_p = 0\text{--}5 \text{ L}$$

$$H_p = 40 \text{ m}$$

4.10. Odpadne vode

4.10.1. Odpadne vode prilikom regeneracije ionskih filtara

Količina vode za rahljenje:

$$Q_w = F [m^2] \times BV [m^3/m^2h] = 1,767 \times 5$$

$$Q_w = 8,835 \text{ m}^3/h$$

Potrošnja vode za rahljenje od 15 min:

$$V_1 = \frac{Q_w}{60} \times 15 = \frac{8,835}{60} \times 15$$

$$V_1 = 2,209 \text{ m}^3$$

Količina otpadnih voda nakon uvođenja kemikalija:

$$V_2 = \text{HCl (3\%)} = 2,42 \text{ m}^3$$

$$V_3 = \text{NaCl (8\%)} = 1,3 \text{ m}^3$$

Količina otpadnih voda nastalih ispiranjem ionskih masa:

$$V_4 = 7 \times (V_{m1} + V_{m2}) = 7 \times (1,2 + 0,73) = 13,51 \text{ m}^3$$

Ukupna količina otpadnih voda:

$$V_u = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 2,21 + 2,42 + 1,3 + 13,51$$

$$V_u = 19,44 \text{ m}^3$$

4.10.2. Kapacitet bazena i turbopuhala

Brutto volumen bazena:

$$V_b = 25 \text{ m}^3$$

Zbog potrebe miješanja otpadnih voda u bazenu za neutralizaciju instalirati će se perforirani cjevovod za dovod zraka kojeg dobavlja turbopuhalo.

Potrebna količina zraka za miješanje:

$$5\text{--}10 \text{ m}^3 \text{ zraka/m}^3 \text{ vode}$$

Kapacitet turbopuhala:

$$V_z = V_b \times (5\text{--}10) = 25 \times 8 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

Visina dobave:

$$H_z = 5\text{--}6 \text{ m}$$

4.10.3. Neutralizacija otpadnih voda

Otpadne vode dobivene prilikom regeneracije sadrže, osim neutralnih soli i višak HCl preostao nakon regeneracije slabo kisele kationske mase.

Iz proračuna regeneracije slabo kisele ionske mase slijedi:

$$\text{HCl (100\%)}_{\text{viš}} = \text{HCl (100\%)} - \text{HCl (100\%)}_{\text{teor}} = 73,382 - 69,888$$

$$\text{HCl (100\%)}_{\text{viš}} = 3,494 \text{ kg/reg}$$

$$\text{HCl (100\%)}_{\text{viš}} = \frac{3,494 \times 1000}{36,465} = 95,82 \text{ val/L}$$

Potrebna količina NaOH za neutralizaciju:

$$\text{NaOH (100\%)} = \text{HCl (100\%)}_{\text{viš}} [\text{val/L}] \times 40/1000$$

$$\text{NaOH (100\%)} = \frac{97,35 \times 40}{1000} = 3,894 \text{ kg/reg}$$

$$\text{NaOH (40\%)} = \text{NaOH (100\%)} / 0,4 = 3,894 / 0,4$$

$$\text{NaOH (40\%)} = 9,735 \text{ kg/reg}$$

$$\text{NaOH (40\%)} = 9,735 / 1,43 = 6,81 \text{ L/reg} = 6,81 \text{ L/dan}$$

Nakon doziranja NaOH (40%) u neutralizacijski bazen vrši se kontrola pH vrijednosti.

Otpadne vode smiju se ispuštati u kanalizacijsku samo ako im se pH vrijednost kreće oko 7.

Miješanje otpadnih voda pospješuje se recirkulacijom vode, pomoću posebne pumpe.

Posebne pumpe služe za pražnjenje bazena.

4.11. Rekapitulacija potrošnje kemikalija

4.11.1. Potrošnja HCl (30%)

Dnevna potrošnja HCl (30%) = 212,702 L/dan

4.11.2. Potrošnja NaCl (20%)

Dnevna potrošnja NaCl (20%) = 476,92 L/dan

4.11.3. Potrošnja NaOH (40%)

- za korekciju pH vrijednosti: 5,088 L/dan
- za kondicioniranje napojne vode: 0,7 L/dan
- za neutralizaciju otpadnih voda: 6,81 L/dan

Dnevna potrošnja NaOH (40%) = 12,6 L/dan

4.11.4. Potrošnja Na₃PO₄ (100%)

Dnevna potrošnja Na₃PO₄ (100%) = 0,2 kg

4.11.5. Potrošnja Lewoksina 15

Dnevna potrošnja N₂H₄ (15%) = 2,66 kg

5. ZAKLJUČAK

Voda zadanog sustava može se pripremiti pomoću više tehnoloških postupaka, kako je prikazano u poglavlju 2.

Izbor tehnološkog postupka temeljio se na zahtjevu za kvalitetom vode i postotku odsoljavanja.

Također je vođeno računa o tome da investicijska ulaganja budu što je moguće manja, a da se pri tome ipak zadovolje prva dva uvjeta.

Odabran je tehnološki postupak dekarbonizacije sirove vode pomoću slabo kationskog izmjenjivača i umekšavanje neutralnom kationskom izmjenom.

Tim postupkom drastično se smanjuje količina odsoljavanja u odnosu na slučaj kad bi se dodatna napojna voda pripremala samo umekšavanjem neutralnom kationskom izmjenom pomoću jako izmjenjivača u Na-formi.

Iz proračuna odsoljavanja (poglavlje 2) vidljivo je da se uz najmanju količinu povratnog kondenzata $G_2 = 10$ t/h odsoljavanje smanjuje sa 40,5% na 4,8% od proizvedene pare.

Ušteda na količini odsoljavanja, odnosno na dodatnoj napojnoj vodi iznosi:

$$\Delta G = G \times (0,405 - 0,048) = 25 \times 0,357$$

$$\Delta G = 8,925 \text{ t/h} = 8925 \text{ kg/h}$$

Za vrijeme šesnaestosatnog pogona štedi se:

$$\Delta G_D = 16 \times 8,925 = 142,8 \text{ t/h}$$

Također se štedi i na količini otpadne topline:

$$\Delta Q [\text{kJ/h}] = \Delta G [\text{kg/h}] \times (h_{\text{ods}} - h_{\text{ov2}})$$

$$\Delta Q = 8925 \times (908 - 146,47)$$

$$\Delta Q = 6796,6 \text{ MJ/h}$$

Za vrijeme šesnaestosatnog pogona štedi se:

108746 MJ/dan

Ako se pretpostavi zemni plin kao gorivo, stupanj iskorištenja parnog kotla

$\eta_{PK} = 0,9$ i donja ogrjevnna moć plina $H_d = 37 \text{ MJ/m}^3$, ušteda na gorivu iznosi:

$$\Delta V_g = \frac{\Delta Q}{H_d \times \eta_{GR}} = \frac{6795,6}{0,9 \times 37}$$

$$\Delta V_g = 204,07 \text{ m}^3/\text{h}$$

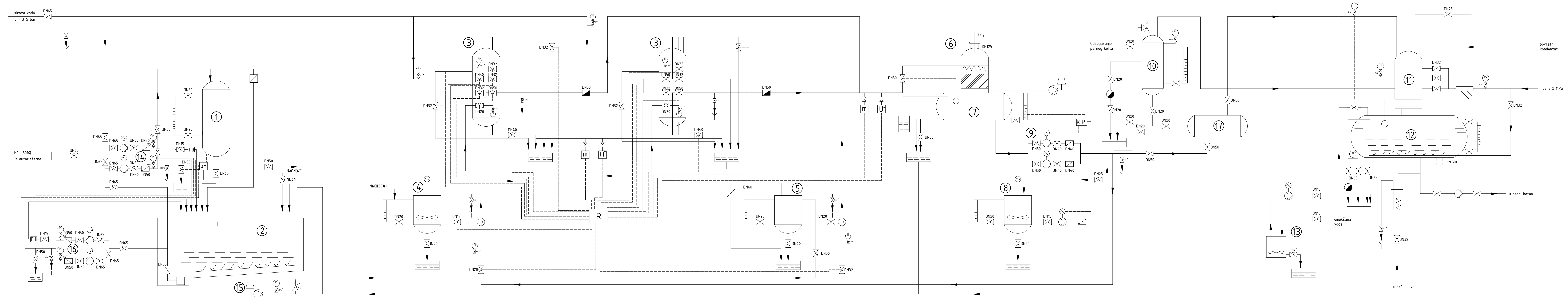
Dnevna ušteda na gorivu:

$$\Delta V_{gD} = 204,07 \times 16 = 3265,12 \text{ m}^3/\text{dan}$$

Na osnovu ove analize lako je zaključiti koji su tehnološki postupci optimalni u pogledu uštede vode, topline i goriva.

LITERATURA


- [1] Juretić H., Dobrović S., Ljubas D.: Predavanja iz kolegija „Voda, gorivo i mazivo“
- [2] HRN EN 12953-10:2004 Dimnocijevni kotlovi – 10. Dio.
- [3] Kraut, B.: „Strojarski priručnik“, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [4] Galović A.: „Termodinamika I“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2010.
- [5] Toplinske tablice katedre za termotehniku i procesnu tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje (skripta), 2008.
- [6] Katalog za izbor ionskih masa tvrtke „Lanxess“, Köln
- [7] HRN M.E2.250 Proračun dijelova pod tlakom. - Opći zahtjevi
- [8] HRN M.E2.253 Cilindrični plaštev i kugle izvrgnuti unutarnjem tlaku



LEGENDA

1. Spremnik za HCl (30%)
2. Neutralizacijski bazen
3. Dvoslojni ionski filter
4. Odmjerna posuda za NaCl
5. Odmjerna posuda za HCl
6. Otplinjivač CO₂
7. Spremnik umekšane vode
8. Uređaj za doziranje NaOH
9. Pumpe za umekšanu vodu
10. Ekspanzijska posuda
11. Termički otplinjivač
12. Napojni spremnik
13. Uređaj za doziranje natrijevog trifosfata i hidrazina
14. Pumpe za pretovar za HCl
15. Turbopuhalo
16. Pumpe za pražnjenje neutralizacijskog bazena
17. Izmjenjivač topline

- Ventil
- Membranski ventil
- Manometar
- Termometar
- Protokomjer
- Membranska pumpa
- Centrifugalna pumpa
- Probnii pipac
- Hvatač nečistoća
- Regulator tlaka
- Sigurnosni ventil
- Zaporni ventil
- Filtar
- K.P. Komandna ploča
- Turbopuhalo
- Ejektor
- Sumirajuće brojilo protoka
- Kondenzni lonac
- Nivo-regulator

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	9.2016.	Hrvoje Štrbac			
Razradio	9.2016.	Hrvoje Štrbac			
Crtao	9.2016.	Hrvoje Štrbac			
Pregledao	9.2016.	doc. dr. sc. Hrvoje Juretić			
Objekt:	POSTROJENJE ZA PRIPREMU KOTLOVSKJE NAPONE VODE (TEHNOLOŠKA ŠHEMA)			Objekt broj: 000-000-000	Listova: 2
				R. N. broj:	List: 1

